

**Модели абсолютно черного тела (обзор)***И. С. Гибин, П. Е. Котляр*

*Представлен обзорно-аналитический материал по инфракрасным источникам излучения на примерах моделей абсолютно черного тела (АЧТ). Рассмотрены вопросы появления понятия абсолютно черного тела с первых работ Кирхгофа. Отмечены уникальные свойства моделей АЧТ, связанные с тем, что все спектральные радиационные характеристики определяются только температурой и не зависят от других параметров системы, а также то, что все спектральные распределения для АЧТ соответствуют максимально возможному тепловому излучению при заданной температуре. Рассмотрены полостные модели излучающей поверхности, особенности нагрева излучателей, модели АЧТ на температурах фазовых переходов, модели АЧТ с жидкометаллической тепловой трубой, протяженные модели АЧТ. Представлены требования к параметрам излучения АЧТ для аппаратуры космических систем, метрологической аппаратуры, имитационно-моделирующих инфракрасных стендов.*

*Ключевые слова:* источники инфракрасного излучения, абсолютно черное тело, модели излучающей поверхности, инфракрасные спектры излучения, температурные фазовые переходы, полостные излучатели, жидкометаллические тепловые трубы.

**Ссылка:** Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 188.

**Reference:** I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, Usp. Prikl. Fiz. 7 (2), 188 (2019).

**Введение**

Во всех известных классификациях источников излучения модели абсолютно черного тела (АЧТ) относятся к категории эталонных и образцовых. Это обусловлено уникальными свойствами АЧТ, занимающего особое место в теоретической и прикладной оптике [1, 19, 25].

С момента введения понятия абсолютно черного тела в 1859 году Г. Р. Кирхгофом, ко-

торый установил связь между испускательной и поглощательной способностями тела, находящегося в равновесии с излучением при определенной температуре, вплоть до настоящего времени развитие работ по АЧТ претерпело два максимума. Первый максимум соответствует периоду зарождения квантовой физики и связан с необходимостью создания прецизионной аппаратуры (эталонного объекта) для экспериментальной проверки фундаментальных законов теплового излучения. Второй максимум соответствует современному периоду практического освоения инфракрасного и терагерцового диапазонов и связан с созданием эталонных или измерительных источников излучения, предназначенных для градуировки аппаратуры и приборов, измерения различных характеристик (спектральной чувствительности приемников излучения, исследования временной стабильности радиометрической аппаратуры, пропускания материалов и различных сред) [2].

**Гибин Игорь Сергеевич**<sup>1,2</sup>, гл.н.с., д.т.н. профессор.

**Котляр Петр Ефимович**<sup>1</sup>, с.н.с., д.г.-м.н., профессор.

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

Тел.: +7(913) 464-27-06, +7(903) 935-16-31.

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет.

630073, Новосибирск, проспект К. Маркса, 20.

E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22 февраля 2019 г.

© Гибин И. С., Котляр П. Е., 2019

В 1860 году Г. Кирхгоф впервые предложил в качестве эталонного излучателя использовать сферический изотермический сосуд с малым отверстием и сформулировал условия, которыми следует руководствоваться при конструировании черного тела. Кирхгоф показал, что на характер излучения практически не влияют геометрическая форма полости и материал ее стенок. Важно лишь, чтобы полость находилась при постоянной температуре и площадь отверстия была намного меньше площади внутренней поверхности полости [33].

Практическая реализация идей Г. Кирхгофа была осуществлена только через 25 лет С. Больцманом. Можно лишь поражаться интуиции и высочайшей экспериментальной культуре физиков-экспериментаторов конца XIX века О. Люммера, В. Вина, Ф. Курлбаума и Э. Прингсгейма в 1895–1903 гг. выполнивших практическую реализацию нескольких моделей абсолютно черных тел, основные конструкторские идеи которых с успехом используются до настоящего времени [9]. В первых конструкциях АЧТ для экспериментальной проверки законов теплового излучения они использовали сферическую или цилиндрическую металлическую полость, выполненную из железа или меди, которая с внутренней стороны покрывалась сажей или оксидом урана. Для стабилизации температуры полость помещалась в различные жидкости (жидкий воздух, кипящую воду, расплавленную селитру или в другие материалы с известной температурой фазового перехода). Эти конструкции позволяли получать равновесное излучение в диапазоне температур от  $-188$  до  $+1200$  °С. Для достижения ещё больших температур в 1898 г. они разработали черное тело с электрическим нагревом: зачерненная внутри фарфоровая полость помещалась в платиновый цилиндр, к которому подводились электрические контакты. С помощью этой схемы удалось поднять температуру черного тела до  $1500$  °С, а в 1903 г. до  $2100$  °С, за счет использования вместо платины графитовой трубки. Используя модель черного тела (МЧТ), Фридрих Пашен в 1897 г. точными измерениями подтвердил справедливость закона Стефана–Больцмана, а в 1899 г. провел тщательную проверку закона смещения Вина.

В ходе многочисленных экспериментов с МЧТ было установлено, что спектральное распределение плотности энергии излучения полости зависит от температуры полости и не зависит ни от размеров полости или ее форм, ни от свойств, помещенных в нее материальных тел. Тепловое излучение с поверхности черного тела представляет собой диффузное излучение, которое распределяется равномерно во всем пространстве полусферы.

Два уникальных свойства моделей абсолютно-черных тел выделяют их излучение на особое место эталона [2].

Первое из них связано с тем, что все спектральные радиационные характеристики определяются только одним параметром состояния — температурой и не зависят от других параметров системы.

Второе свойство связано с тем обстоятельством, что все спектральные распределения для абсолютно черного тела соответствуют максимально возможному тепловому излучению тел при заданной температуре.

Основными элементами МЧТ являются следующие узлы: излучатель, выполненный в виде изотермической полости из материала с высокой излучательной способностью поверхности, система радиационных экранов; диафрагма, датчик измерения температуры излучателя, система регулировки и стабилизации температуры излучателя, набор мир или мишеней различных форм и размеров для определения характеристик оптико-электронных систем.

## 1. Полостные модели АЧТ

### 1.1. Конфигурация излучающей полости

На рис. 1 представлены формы полостей, применяемых при конструировании моделей АЧТ. В основе всех форм используется полость с малым входным отверстием.

Формы полостей, представленные на рис. 1, отнюдь не исчерпывают всего многообразия конструктивных решений; однако в расчетном плане они обычно сводятся к трем базовым формам: сфера, цилиндр и конус. Степень черноты полости  $\varepsilon'$  зависит от отражательной способности стенок  $\varepsilon$  и числа отражений  $n$ , которые испытывает луч перед выходом из полости:  $\varepsilon' = 1 - \varepsilon^{n+1}$ .

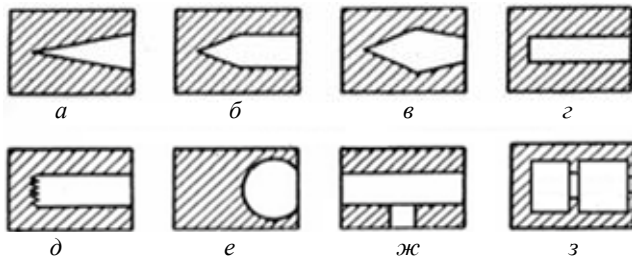


Рис. 1. Формы полостей, применяемые для создания моделей АЧТ по [36] с добавлениями: а–в – полости с использованием кругового конуса; г – цилиндрические или коробчатые полости с гладким дном; д – цилиндрические или коробчатые полости с гофрированным дном; е – сферическая полость; ж – трубка с отверстием (щелью); з – цилиндрические или коробчатые полости с разделительной диафрагмой.

При сравнительном анализе форм полостей обычно используется подход А. Гуффе, основанный на оценке эффективного коэффициента излучения полости. Используя допущение о диффузности излучения стенок, Гуффе [31] получил выражение эффективного коэффициента излучения полости  $\varepsilon'$  в виде:

$$\varepsilon' = \frac{\varepsilon(1+k)}{\varepsilon(1-A/S) + A/S},$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент излучения стенок полости;  $A$  – площадь отверстия в полости, через которое выходит излучение;  $S$  – полная площадь поверхности полости, включающая площадь отверстия;  $k = (1 - \varepsilon)(A/S - A/S_0)$ ;  $S_0$  – площадь поверхности эквивалентной сферы, диаметр которой равен расстоянию от плоскости отверстия до самой дальней точки полости.

Аналитические выражения эффективного коэффициента излучения полостей различной формы приведены в работах [3, 8, 13, 23, 27]. Самим А. Гуффе были составлены таблицы и номограммы для расчетов моделей АЧТ с полостями различной формы, которые широко использовались для выбора различных конструктивных решений в докомпьютерную эпоху.

Сравнение различных форм полостей показывает, что при данном значении  $L/r$  наибольший эффективный коэффициент излучения имеет сферическая полость. Недостатком сферической полости являются относительные трудности ее изготовления и обеспечения равномерного нагрева. Цилиндрическая по-

лость является простейшей в изготовлении, однако возникают трудности ее равномерного нагрева, особенно со стороны глухого торца. Для уменьшения коэффициента отражения от глухой торцевой поверхности используют сочетание цилиндра с конусом (рис. 1, б), цилиндр с гофрированной (V-образные концентрические выточки с углом раствора  $30^\circ$ ) торцевой поверхностью (рис. 1, д) и цилиндр, торцевая поверхность которого выполнена в виде микропризм (рис. 2).

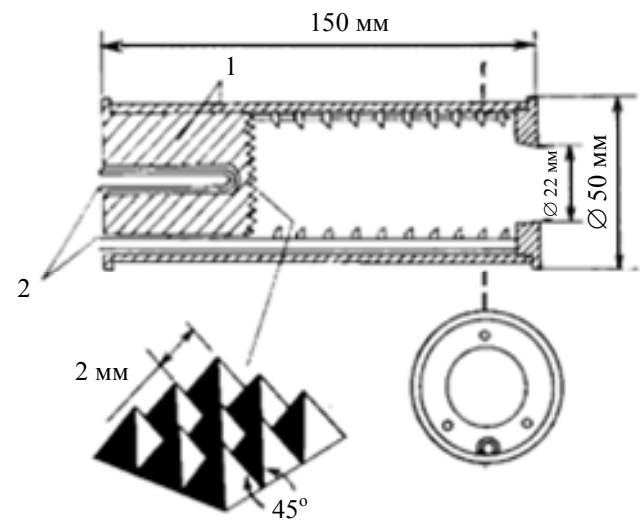


Рис. 2. Конструкция цилиндрического черного тела с микропризматической торцевой поверхностью и отражательными перегородками по [15].

Для снижения отражения от задней стенки к цилиндрической поверхности излучателя, а от нее в апертуру внутри цилиндра монтируются отражательные перегородки с заостренными кромками. Для достижения диффузного рассеяния при отражении и увеличения коэффициента излучения внутренняя поверхность излучателя обычно выполняется шероховатой и оксидированной.

Наиболее удобной в смысле простоты изготовления и возможности равномерного нагрева является коническая полость. В обычно используемых на практике моделях абсолютно черного тела значения  $L/r$  больше 6, а значения коэффициента излучения стенок полости превышают 0,85.

Отверстия в полости, через которое выходит излучение, чаще всего выполняется круглым фиксированного диаметра или изменяемое выходной диафрагмой в пределах 1,0–20 мм. Для специальных применений выходное от-

верстие выполняется квадратным или в виде щели в боковой поверхности цилиндра. Для уменьшения тепловых потерь выходное окно полости иногда защищают специальным экраном, прозрачным в рабочем спектральном диапазоне.

В настоящее время все разнообразие радиационно-геометрических характеристик полостей при конструировании АЧТ учитывается при расчетах теплообмена излучением на ЭВМ [17].

## 1.2. Материал излучающей полости

Помимо формы и геометрических размеров излучающей полости (ИП), совершенство модели АЧТ зависит от теплофизических и радиационных свойств материала излучателя. Сформулированное Кирхгофом требование изотермичности излучателя является основным при выборе материала и конструкции. При неравенстве температур в различных точках внутри излучателя излучение полости становится неравновесным и поглощательная способность полости снижается. Материал излучателя должен иметь высокую теплопроводность, большой коэффициент излучения и быть стойким к поверхностному окислению [1, 27].

Чрезвычайно широкая область использования АЧТ и широкий диапазон воспроизводимых температур выдвигают дополнительные требования к материалу излучателя. Например, ООО «Росприбор» производит черные тела 8 серий (от серии BLIQ, относящиеся к классу низкотемпературных ЧТ с генерированием отрицательных температур, до серии УНТ, относящиеся к классу ЧТ со сверхвысокой рабочей температурой) [41, 42]. Еще более широкая номенклатура моделей черных тел у компании HGH InfraredSystems (Франция) [38].

Для криогенных и низкотемпературных моделей обычно применяют металлические излучатели, при более высоких температурах используют графит и керамические материалы. Металлический излучатель может быть изготовлен из чистой меди, из меди с вкладыванием из нержавеющей стали, никеля или серебра в зависимости от особых требований и температурного диапазона. Наиболее подхо-

дящей является медь благодаря ее высокой теплопроводности. Однако на поверхности меди образуется пленка окиси, излучательные свойства которой нестабильны при температурах выше 600 К. Нержавеющая сталь марки 1X18H9T имеет относительно высокую теплопроводность, и ее поверхность обладает стабильными излучательными свойствами, что делает этот материал универсальным для изготовления излучателя абсолютно черного тела до температур порядка 1400 К. В некоторых конструкциях АЧТ используется метод нагрева пропусканием тока через излучатель (прямой электронагрев) и в качестве нагревателя используется само тело излучателя, выполняемое из платины, иридия, молибдена, вольфрама или графита марки МПГ-6, температура плавления которого составляет 4020 К. Высокие значения тепло- и электропроводности графита обеспечивают возможность получения приемлемой равномерности поля температуры по излучающей полости в этой области температур и определяют его как оптимальный материал при использовании метода нагрева пропусканием тока через излучатель.

Помимо графита, в высокотемпературных конструкциях моделей АЧТ в качестве материала излучателя также используется керамические материалы, обладающие высокой теплопроводностью и высокой температурой плавления, например, такие как оксид алюминия  $Al_2O_3$ , карбид кремния  $SiC$ , нитрид алюминия  $AlN$ , оксид бериллия  $BeO$ , оксиды тория  $ThO_2$  и хромита лантана  $LaCrO_3$  [32]. Теплопроводность керамик почти на порядок ниже теплопроводности металлов. Однако этот фактор не является определяющим, так как керамические полости в высокотемпературных АЧТ выполняют функцию тиглей для расплавленного металла-теплоносителя.

## 1.3. Нагрев излучающей полости

Диапазон воспроизводимых температур моделей ЧТ в настоящее время простирается от  $-173\text{ }^{\circ}C$  (HGH Infrared Systems (Франция) до  $+2500\text{ }^{\circ}C$  (ООО «Омскэталон» Россия) и разбивается на три области: криогенную, низкотемпературную и высокотемпературную (рис. 3). Использование высокотемпературных МЧТ в ИК-диапазоне длин волн нецелесообразно, так

как повышение температуры не даёт существенного увеличения интенсивности излучения в ИК-области, однако резко увеличивает интенсивность излучения в более коротковолновой области, устранение которой становится серьезной проблемой.

Снижение рабочей температуры МЧТ даёт существенные преимущества, а именно, позволяет работать на воздухе, т. е. отказаться от выходного окна, что особенно важно в ИК-области, и проводить измерения температуры МЧТ контактным методом.

МЧТ представляют собой или эталонную меру температуры переменного значения или воспроизводят фиксированные значения температур (реперные точки). МЧТ в отечественных метрологических лабораториях имеют

максимальную температуру излучателя, достигающую 3500 К. Соответственно ГОСТ Р 8.566-2012 [7] устанавливает требования к моделям абсолютно черных тел в диапазоне температур от  $-50$  до  $+2500$  °С, а именно: абсолютное значение температуры излучателя или диапазон задаваемых абсолютных температур; однородность температур по апертуре излучателя; время выхода излучателя на режим; время перехода излучателя с одного режима на другой.

У большинства известных промышленных моделей АЧТ рабочие температуры не превышают  $600$  °С. Для воспроизведения единиц спектральных величин в области  $3,0$ – $25$  мкм используются МЧТ, работающие в диапазоне температур  $800$ – $1200$  К.

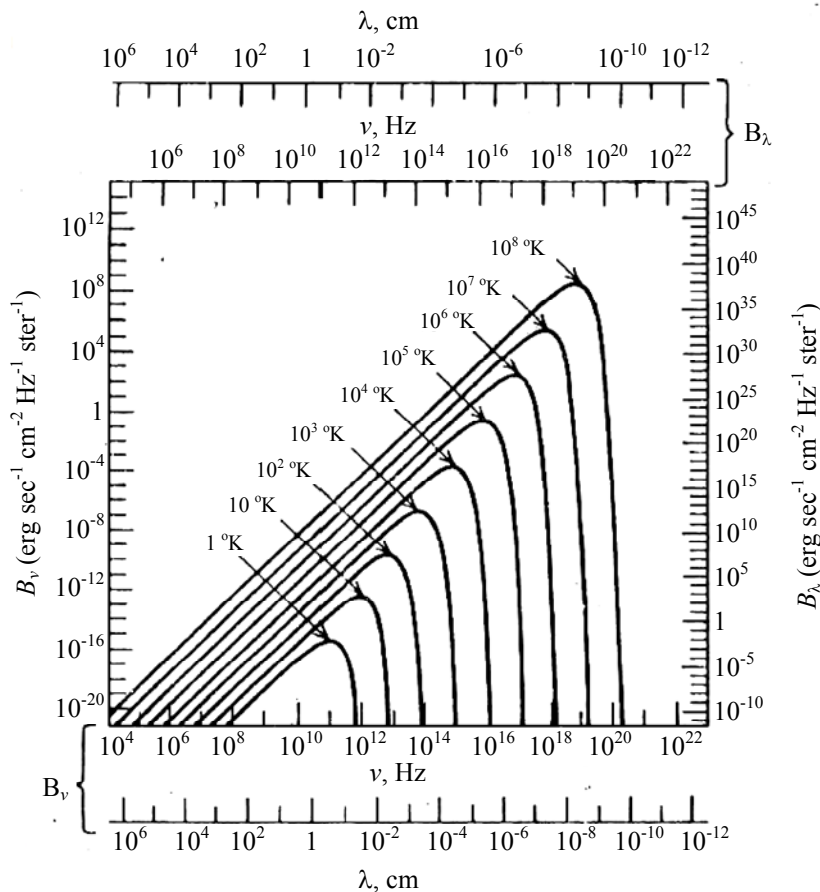


Рис. 3. Излучение абсолютно черного тела по [30].

подавляющее большинство низкотемпературных МЧТ строится на основе трубчатых печей сопротивления с нихромовыми нагревателями из сплавов X20N80, X15N60, размещаемыми преимущественно на наружной поверхности излучателя [14].

Для более равномерного обогрева полости иногда выполняется неравномерная намотка

нагревательной обмотки, её секционирование или установка дополнительных нагревательных обмоток по концам труб. На рис. 4 показана модель абсолютно черного тела с тремя электронагревательными обмотками.

Температурный диапазон излучателя может быть расширен до  $1400$  °С применением сплава канталь [18]. Для более высоких тем-

ператур используются нагреватели из сплава платины и родия. Сплав из платины с 10 % родия используется до 1600 °С. При температурах выше 1600 °С используется сплав с большим содержанием платины или иридия. Канталь-супер используется до температур 1850 °С. При более высоких температурах нагреватели должны работать в атмосфере инертного газа.

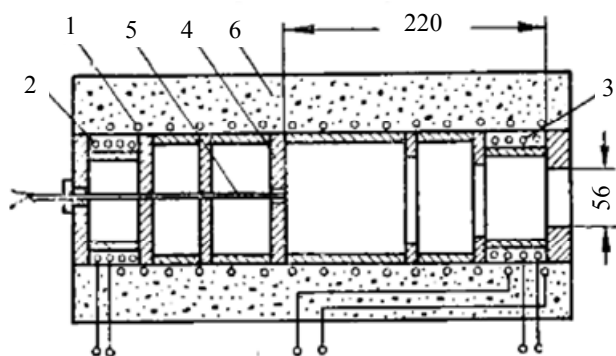


Рис. 4. Трубчатая модель АЧТ с тремя нагревательными обмотками по [27]. 1, 2, 3 – электронагревательные обмотки; 4 – визуруемая перегородка; 5 – термопара; 6 – изоляция.

Метод нагрева МЧТ пропусканием тока через излучатель впервые был применен в 1898 г. О. Люммером и Э. Прингсгеймом. Простейшая конструкция АЧТ с прямым электронагревом представляет собой тонкостенную трубку из высокоомного металла с токоподводами в торцевых частях и малым отверстием в середине для выхода излучения.

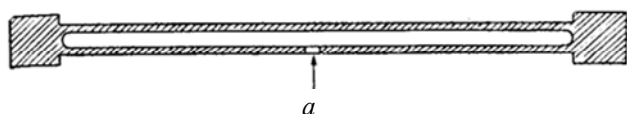


Рис. 5. Простейшая конструкция АЧТ с прямым электронагревом по [29].

Идея черного тела, показанная на рис. 5 в современном исполнении ВНИИМ, получила наименование МЧТ2/900/2800 и представляет собой излучатель в виде малого черного тела, имеющий малые габариты и малое энергопотребление. МЧТ предназначена для калибровки пирометров излучения и других оптических спектральных приборов в области температуры 900–2800 °С. Излучатель выполнен в виде замкнутой цилиндрической полости (трубки) из графита марки МПГ-6, в цен-

тре которой с одной стороны прорезана вертикальная щель. Корпус, в котором установлен излучатель, образуют герметичную полость, заполненную аргоном, что обеспечивает достаточный ресурс работы графитового излучателя. Модель МЧТ состоит из корпуса с излучателем, пирометра обратной связи, который является регулятором температуры и источника питания [24].

Модель высокотемпературного черного тела для температурного диапазона 2500–3200 К, разработанная ВНИИОФИ, содержит излучающую и вспомогательную полости, образованные набором пирографитовых колец, которые имеют токоподводы. Подвижный токоподвод содержит поджатый пружиной подвижный цилиндр с гибкими токопроводами, связанными с торцом камеры МЧТ. Второй торец камеры является вторым токоподводом. Введена дополнительная камера, закрывающая конец цилиндра. Камеры имеют единый газовый объем. Кольца в наборе имеют электросопротивления, увеличивающиеся от кольца к кольцу от середины набора. Набор колец окружен тепловым экраном [28].

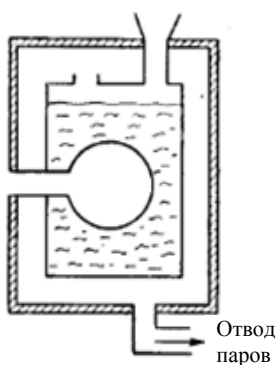
#### 1.4. Модели АЧТ «по методу бани»

Стремление обеспечить изотермичность излучателя привело к разработке многочисленных моделей абсолютно черного тела, осуществляемых «по методу бани». В этих моделях удается достичь наибольшей, по сравнению с другими моделями, равномерности температуры по излучающей оболочке.

Излучатель в модели АЧТ «по методу бани» нагревается обтекающей его жидкостью. Емкость с нагретой жидкостью отделяется теплоизоляцией от стенок кожуха. Материал излучающей полости может быть различным (металл, графит, огнеупорный фарфор) в зависимости от диапазона температур и вещества жидкости. Первой реализацией МЧТ «по методу бани» (рис. 6) можно считать АЧТ в опытах Люммера и Прингсгейма [16]. Простейшей и наиболее распространенной реализацией этой модели является излучатель, помещенный в ванну с перемешивающейся жидкостью. Наличие электрического нагревателя, естественной или принудительной конвекции, а также хорошая теплопроводность жидкости

обеспечивают однородность температуры во всём объёме жидкости. В качестве теплоносителя в диапазоне 1–90 °С в таких банях используют дистиллированную воду. Однородность температурного поля при 50 °С находится на уровне 1 мК, при 90 °С составляет 3 мК. В диапазоне 80–300 °С используют минеральные масла, а в диапазоне 200–600 °С смеси расплавленных солей – азотнокислого натрия и азотнокислого калия.

Для более высоких температур используется ванна с расплавленным металлом. В этом случае в качестве излучающей оболочки обычно применяется огнеупорный фарфор. Для ванны из золота обычно используется графитовая излучающая оболочка.



*Рис. 6. Модель абсолютно черного тела «по методу бани» со сферическим излучателем по [16].*

#### 1.4.1. Модели АЧТ на температурах фазовых переходов

Дальнейшим развитием моделей абсолютно черного тела «по методу бани» является создание МЧТ, работающих на фиксированных температурах фазовых переходов плавления и затвердевания чистых металлов, обладающих высокой стабильностью и воспроизводимостью. Такие МЧТ получили широкое применение при создании государственных эталонов и формировании температурной шкалы [6]. Этот тип черных тел является одним из самых совершенных благодаря высокой степени изотермичности излучающей полости в точке фазового перехода и высокой воспроизводимости температуры фазового перехода.

Так, например, в ОАО НПП «Эталон» (г. Омск) разработана модель АЧТ с автоматическим поддержанием температуры излучающей полости и атмосферой инертного газа (аргона) внутри АЧТ-30/900/2500, которая комплектуется нагревателем специальной конструкции, и может использоваться как печь нагрева ампул для воспроизведения реперных точек плавления (затвердевания) чистых металлов (Ag, Cu, Au, Pt и др.) [4, 34].

Выше точки меди в качестве вторичных стандартов фиксированных точек МТШ-90 были рекомендованы точки затвердевания никеля (1728 К), палладия (1828,0 К) и платины (2041,4 К). Однако практическая реализация черных тел на этих точках не всегда возможна, поскольку в качестве материала тигля, где плавятся металлы, используется графит. Согласно бинарным фазовым диаграммам, даже небольшое количество углерода, попадающее из стенок тигля в металл, существенно снижает его температуру плавления. Применение тиглей из окиси алюминия позволяет избежать углеродного загрязнения, однако изготовление полости черного тела из этого материала невозможно из-за его чрезвычайно низкой излучательной способности. В Национальном метрологическом институте Японии (NMIJ) был предложен альтернативный метод реализации высокотемпературных фиксированных точек, основанный на использовании в качестве материала фазового перехода не чистых металлов, а соединений металлов и углерода (эвтектик). При этом графитовый тигель уже не будет служить источником загрязнения, поскольку углерод сам входит в состав материала фиксированной точки.

Во ВНИИОФИ на основе эвтектик были разработаны МЧТ для следующих реперных точек: Re–C, TiC–C, ZrC–C и HfC–C (см. табл. 1). Они реализованы в виде цилиндрических чернотельных графитовых капсул с излучающей полостью, окруженной материалом эвтектики, что позволило расширить температурный диапазон рекордных точностей до 3458 К (HfC–C).

Таблица 1

**Характеристики некоторых чернотельных излучателей переменной температуры, разработанных во ВНИИОФИ [37]**

Тип	Материал излучающей полости	Размеры полости, мм <sup>3</sup>	Выходн. отверстие, мм	Температурный диапазон	Потребл. мощность (предельн.), кВт
ВВ3200pg	Пиролитический графит	200×37	22	2500–3300	14
ВВ3200	Пиролитический графит	145×32	18	2500–3300	25
ВВ3000p g	Карбид ниобия	350×19	12	2500–3300	25
ВВ22p	Графит	130×22	14	1800–2900	7
ВВ39p	Графит	250×39	30	1800–2900	10
ВВ2700	Карбопласт	280×19	12	2000–2700	15
ВВ2500	Углеродистое стекло	450×19	12	2000–2500	15
ВВ14	Графит	110×14	14	600–2500	3
ВВ2000	Графит	190×90	60	800–2000	8
ВВ1200	Натриевая тепловая труба	100×10	8	800–1200	0,5
ВВ300	Мель	500×140	30	80–300	0,1
ВВ290	Медь	250×40	30	293–473	0,4

#### 1.4.2. АЧТ с жидкометаллической тепловой трубой

Максимальную изотермичность излучателя обеспечивают «бани» с жидкометаллической тепловой трубой. Впервые идея тепловой трубы была предложена R. S. Gaugler в 1942 г. (фирма General Motors Corp.) и описана в патенте США 2 448 261. Первая статья обзорного характера по тепловым трубам в нашей стране вышла в 1969 г. [20]. Тепловые трубы разрабатывались для передачи очень больших количеств тепла из ограниченного объема. Тепловая труба имеет эффективную теплопроводность, которая на четыре порядка превышает теплопроводность меди. Тепловые трубы могут применяться в широком диапазоне температур от -200 °С до 2000–2500 °С. Помещение тепловой трубы в жидкостную рубашку «бани» обеспечивает высокую однородность температуры за счет чрезвычайно высокой теплопроводности (градиент температур не более 0,01 °С/см). Для теплотрубного изотермического блока практически отсутствует запаздывание между временем достижения температуры в нагревателе и верхней точки контрольной поверхности. Изготовленные МЧТ для спектральной области 3,0–25 мкм, работающих в диапазоне температур 800–1200 К с излучающей полостью в виде

тепловой трубы с натриевым теплоносителем, освоена ВНИИОФИ.

В лаборатории терморегулирования Института тепло- и массообмена Национальной академии наук Белоруссии создан типовой ряд теплотрубных изотермализаторов различного назначения, в первую очередь, для метрологии. Пространственная неизотермичность таких устройств лежит в диапазоне 0,01–0,001 К [12, 40].

#### 1.5. Модели АЧТ криогенного температурного диапазона

Модели АЧТ криогенного температурного диапазона находят применение в оптико-электронных системах, использующих фотоприемные матрицы с криогенным охлаждением.

Излучатели АЧТ криогенного температурного диапазона могут быть построены с использованием различных физических эффектов (охлаждение газа при расширении, обратный термоэлектрический эффект, охлаждение холодным веществом и т. д.).

Под криогенными обычно понимают устройства, работающие при температурах, лежащие ниже точки кипения жидкого воздуха (около 80 К). Практически применяют следующие сжиженные газы: воздух (TN = 80 К),



азот ( $T_N = 77,4 \text{ К}$ ), неон ( $T_N = 27,1 \text{ К}$ ), водород ( $T_N = 20,4 \text{ К}$ ), гелий ( $T_N = 4,2 \text{ К}$ ). Откачивая испаряющийся газ из герметизированного сосуда, можно уменьшать давление над жидкостью и тем самым понижать температуру её кипения. Таким образом, изменением давления паров над кипящей жидкостью можно регулировать её температуру. Естественная или принудительная конвекция и хорошая теплопроводность хладагента обеспечивают при этом однородность температуры во всём объёме жидкости. Таким путём удаётся перекрыть широкий диапазон температур: от  $77 \text{ К}$  до  $63 \text{ К}$  с помощью жидкого азота, от  $27 \text{ К}$  до  $24 \text{ К}$  – жидкого неона, от  $20 \text{ К}$  до  $14 \text{ К}$  – жидкого водорода, от  $4,2 \text{ К}$  до  $1 \text{ К}$  – жидкого гелия. Промежуточные температуры, лежащие между указанными выше интервалами, достигаются за счет регулирования скорости испарения жидкости нагревателем [21].

## 2. Протяженные или плоскостные модели АЧТ

Для градуировки приемников ИК-излучения и радиометров, воспринимающих радиацию в пределах большого телесного угла, необходимо иметь эталонные источники излучения с большой излучающей площадью. Традиционно такие модели имеют площадку из металла с высокой теплопроводностью, окрашенную составом с высоким коэффициентом излучения. Температура площадки задается, поддерживается и измеряется с высокой точностью. В таких излучателях могут быть воспроизведены и отрицательные температуры.

Одной из проблем для таких ЧТ оказывается достижение однородности температуры по всей площади излучающих диафрагм. Кроме того, здесь приходится сталкиваться с большой тепловой инерцией таких имитаторов, т. е. с трудностью достаточно быстро изменять температуру излучателя [39].

Модель АЧТ, описанная в [5], представляет собой тонкую ( $1,5 \text{ мм}$ ) пластину из алюминиевого сплава, на одну из поверхностей которой наклеен нагревательный элемент, а вторая является рабочей излучающей поверхностью. Для повышения коэффициента излучательной способности излучающая поверхность пластины подвергалась химическому

оксидированию, затем на нее наносилась специальная черная матовая эмаль.

Испытания продемонстрировали, что при достаточно легко реализуемой форме нагревателя в виде «змейки» достигается высокая равномерность температуры по излучающей поверхности модели АЧТ. Основным источником возникновения неравномерности температуры по излучающей поверхности модели АЧТ являются краевые эффекты. Фотография модели протяженного АЧТ по [5] представлена на рис. 7.



Рис. 7. Фотография модели протяженного АЧТ по [5].

Фирма Cl-Systems (Израиль) поставляет квадратные чернотельные панели с протяженной поверхностью излучения SR-80 с размерами от  $2'' \times 2''$  до  $40'' \times 40''$  с температурной равномерностью от  $\pm 0,005 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $\pm 0,030 \text{ }^\circ\text{C}$  [39].

Чернотельные панели фирмы HGH-Infrared Systems (см. рис. 8) представляют собой развитие принципа многокамерности, впервые сформулированного в работе [10]. Принцип многокамерности предусматривает замену одной большой излучающей полости множеством небольших полостей-ячеек, отвечающих следующим требованиям: каждая ячейка по своим свойствам приближается к абсолютно черному телу; ячейки подобны и предельно сближены; площадь перегородок между ячейками мала по сравнению с суммарной площадью отверстий.



Рис. 8. Фирма HGH-Infrared Systems поставляет квадратные чернотельные панели с площадью излучения до  $1000 \times 1000 \text{ мм}$  и высоким коэффициентом излучения благодаря микропирамидальной поверхности [22].

В ЛЭТИ в конце 60-х годов были разработаны многокамерные черные тела с диаметрами излучающей площади 250 и 500 мм (рис. 9). Тела представляют собой совокупность большого числа идентичных равномерно нагретых взаимно прилегающих медных ячеек (рис. 10).

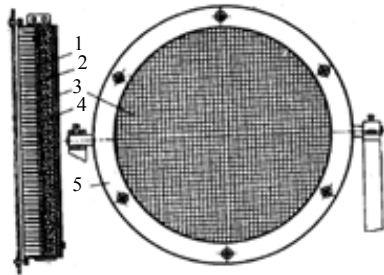


Рис. 9. Конструкция многокамерного черного тела с диаметром излучающей площади 500 мм: 1 – медный диск; 2 – нагреватель; 3 – медные пластины; 4 – керамический диск; 5 – диафрагма.

При температуре 400 °С неравномерность нагрева диска-подложки не превышала 1 °С. Температура края ячейки была меньше температуры ее дна на 4–5 °С. Коэффициент излучения одной ячейки, определенный расчетным путем, 0,996. Усредненная степень черноты излучающей поверхности 0,993. Использо-

вание принципа многокамерности позволяет получать любые заданные размеры площадки излучения.

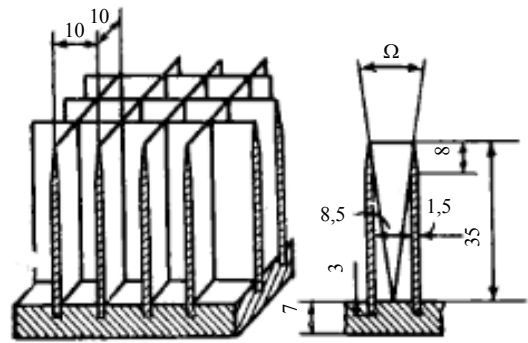


Рис. 10. Конструкция ячейки по [11].

### Заключение

Наиболее жесткие требования к параметрам излучения АЧТ как элемента бортовой аппаратуры космических систем мониторинга глобальных изменений климата сформулированные международными метеорологическими организациями обобщены в работе [26] представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### Максимальные требования к точности и стабильности бортовой радиометрической аппаратуры

Спектральный диапазон	Требуемая радиометрическая точность	Требуемая радиометрическая стабильность (за десятилетие)
(0,3–3) мкм	0,5 %	0,1 %
(3–15) мкм	0,1 К	(0,01–0,04) К

Указанные параметры принципиально достижимы, если в конструкцию модели АЧТ будут заложены уже апробированные решения, такие как излучатели с фиксированными температурами на основе фазовых переходов в сверхчистых металлах, тепловыми трубами и новыми материалами для покрытия внутренних поверхностей излучателя на основе углеродных нанотрубок.

Компания SurreyNanoSystems создала на основе углеродных нанотрубок материал (рис. 11), который получил название Vantablack (Vertically Aligned Nano Tube Arrays). У этого материала зафиксирован самый низкий коэффициент отражения среди всех известных материалов — всего 0,036 %.

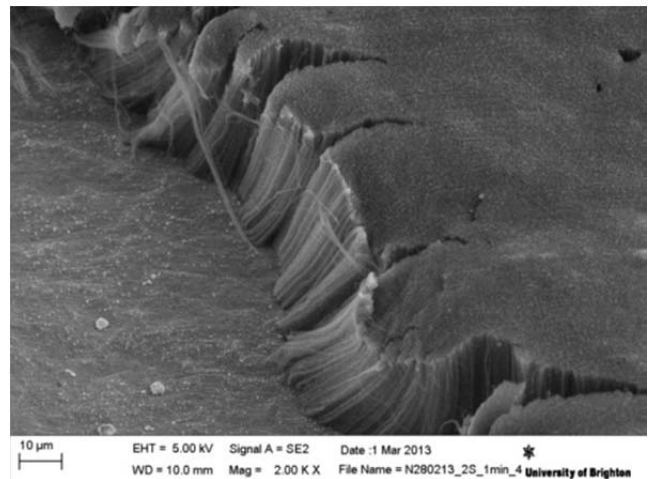


Рис. 11. Покрытие Vantablack 2 на алюминиевой подложке [35].

ФГУП ВНИИОФИ лидирует в разработке уникальных МЧТ. В МЧТ 100 достигнута излучательная способность  $0,997 \pm 0,001$  при неравномерности температуры по излучающей поверхности  $0,04$  К и апертуре  $100$  мм, а в МЧТ на фазовых переходах индия и галлия достигнута рекордная излучательная способность  $0,9999$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ конструкции высокотемпературного черного тела и исследование методов абсолютной и относительной радиометрии; <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=903350>.
2. Ахманов С. А. Физическая оптика. – М.: Изд-во МГУ; Наука, 2004.
3. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков Л. Н. Теплообмен излучением: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Бродников А. Ф., Черепанов В. Я. Оптимизация теплового режима при воспроизведении реперных точек температурной шкалы; <https://cyberleninka.ru/.../optimizatsiya-teplovogo-rezhima-pri-vosproizvedenii->
5. Васильев В. Н., Дмитриев И. Ю., Тихонов С. В. // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 9. С. 71.
6. Винокуров Д. К., Копятевич Р. М. // Космонавтика и ракетостроение. 2016. № 5 (90). С. 151.
7. ГОСТ Р 8.566-2012 Излучатели в виде модели абсолютно черного тела. – М.: Стандартинформ, 2014.
8. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975.
9. Исаев И. В. Вин и история открытия законов теплового излучения – М.: Мос. гос. обл. университет, 2016.
10. Козырев Б. П., Бузников А. А. Авт. СССР № 164077 от 10.06.1964.
11. Козырев Б. П., Бузников А. А. // Известия ЛЭТИ им. Ульянова (Ленина). 1966. Вып. 55. С. 87.
12. Конец С. В., Домород Л. С., Конева Н. С. Разработка теплотрубной изотермической технологии для температурной метрологии; <http://temperatures.ru/pdf/Konev.pdf>
13. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио. 1984.
14. Ксенофонов А. Г. Расчет и конструирование нагревательных устройств. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
15. Куинн Т. Температура. – М.: Мир, 1985.
16. Лебедева В. В. Экспериментальная оптика. – М.: Изд. МГУ; 2005.
17. Льюис Марио. История физики. – М.: Мир, 1970.
18. Татарышкин А. В. // Оборудование и инструмент для профессионалов. Металлообработка. 2015. № 5. С. 62.
19. Механиков А. И. Модели черного тела в метрологии. Меры шумового излучения. – Менделеево: ВНИИФТРИ, 2014.
20. Москвин Ю. В., Филиппов Ю. А. // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7. № 4. С. 766.
21. Озарев С. А., Самойлов М. Л. / Труды XXIV Международной научно-технической конференции и школы по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: НПО «Орион», 2016. С. 481.
22. Продукция компании HGH, [www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/](http://www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/)
23. Русин С. П., Пелецкий В. Э. Тепловое излучение полостей. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
24. Сильд Ю. А., Матвеев М. С., Походун А. И., Визулайнен Е. В. Исследование нового излучателя ВНИИМ для метрологического обеспечения радиационной термометрии (ВНИИМ); <http://temperatures.ru/pdf/Matveev1.pdf>
25. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004.
26. Голстых Г. Н. Диссерт. канд. техн. наук. – М.: ВНИИОФИ, 2001.
27. Хадсон Р. Инфракрасные системы. – М.: Мир, 1972.
28. Хлевной Б. Б. и др. Модель черного тела. Патент РФ 2148801, G01J5/02 с приоритетом от 1998-08-25
29. Шишловский А. А. Прикладная физическая оптика. – М.: Физматгиз, 1961.
30. Btrnardis P. Criogenic Detectors for Low-energy Astronomy. Why, When and How. Radiation Detection of low Temperature – La Londe Les Maures (France) May 23. 2012.
31. Gouffe A. // Rev. Optique. 1945. Vol. 24. P. 1.
32. <http://naukarus.com/tsilindricheskaya-model-absolyutno-chernogo-tela-iz-hromita-lantana>
33. <http://www.constant-kazan.ru/teploluchi/30.php>
34. <http://www.omsketalon.ru/>
35. <https://habr.com/post/394997/>
36. <https://media.ls.urfu.ru/403/1083/2222/2138/724/>
37. <https://msd.com.ua/spravochnaya-kniga-po-svetotexnike/radiometriya-i-spektroradio-metriya-opticheskogo-izlucheniya/>
38. <https://www.hgh-infrared.com/ru/Media/PDF/Blackbody-selection-guide>
39. <https://www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/Absolyutno-chiornye-tela/Vysokotemperaturnoe-absolyutno-chiornoe-telo-s-rasshirenym-diapazonom-dejstviya>
40. <https://www.ippe.ru/cooperation/industry/157-thermal-tubes>
41. <https://www.rospribor.com/>
42. Sapritsky V. I. et al. // Applied Optics. 1997. Vol. 36. P. 5403.

## Absolutely black body models (a review)

I. S. Gibin<sup>1,2</sup> and P. E. Kotlyar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences  
1 Akademika Koptuga Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical Univesity  
20 K. Marks Ave., Novosibirsk, 630073, Russia  
E-mail: gibin@iae.nsk.su; 21031940@mail.ru

Received February 22, 2019

***This article presents the review and analysis of infrared radiation sources on the examples of absolutely black body (ABB) models. The article observes subjects of the appearance of the term absolutely black body since the first Kirchhoff works. The article also outlines the unique capabilities of absolutely black body models, that are connected with the fact that the spectral radiation features are defined only by temperature and do not depend on other parameters of the system, besides it is mentioned that all spectral distributions for ABB correspond with the maximum possible thermal radiation within the specified temperature. The article observes the cavity-type models of the reflecting surface, peculiarities of the reflecting surface heating, and ABB models on phase change temperatures, ABB models with liquid-metal heat pipe, long length ABB models. The article presents the requirements to the parameters of ABB radiation for the space systems facilities, metrological devices, simulative-modelling infrared stands.***

***Keywords:*** infrared radiation sources, absolutely black body, models of a radiation surface, infrared spectral radiation features, phase change temperatures, cavity-type models of the reflecting surface, liquid-metal heat pipes.

### REFERENCES

1. *High temperature black body construction analysis and the research of absolute and relative radiometry methods*; <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=903350> [in Russian].
2. S. A. Akhmanov, *Physical Optics* (Nauka, Moscow, 2004) [in Russian].
3. A. G. Blokh, Y. A. Zhuravlev, and L. N. Ryzhkov, *Heat exchange by radiation: Reference book* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
4. A. F. Brodnickov and V. J. Cherepanov, <https://cyberleninka.ru/.../optimizatsiya-teplovogo-rezhima-pri-vozproizvedenii->
5. V. N. Vasiliev, I. Y. Dmitriev, and S. V. Tikhonov, *Optical Journal* **76** (9), 71 (2009).
6. D. K. Vinokurov and R. M. Kopiatkevich, *Cosmonautics and Rocket Production*, No. 5 (90), 151 (2016).
7. *GOST R 8.566-2012. Radiators in terms of the absolute black body model* (Standardinform, Moscow, 2014).
8. R. Ziegel and J. Howell, *Thermoexchange by Means of Radiation* (Moscow, Mir, 1975) [in Russian].
9. I. V. Isayev, *The history of the laws of thermal radiation discovery* (MGU, Moscow, 2016) [in Russian].
10. B. P. Kozyrev and A. A. Bouznickova, *Aut. USSR* No. 164077, 10.06.1964.
11. B. P. Kozyrev and A. A. Bouznickova, *Technical University "LETI" news-bulletin*, No. 55, 87 (1966).
12. S. V. Konev, L. S. Domorod, and N. S. Koneva, <http://temperatures.ru/pdf/Konev.pdf>
13. L. Z. Kriskunov, *Reference book on the basics of infrared technique*. (Moscow, Soviet Radio, 1984) [in Russian].
14. A. G. Ksenofontov, *Calculation and constructing of heating devices* (Moscow State Technical University, 2014) [in Russian].
15. T. G. Quinn, *Temperature* (Moscow, Mir, 1985) [in Russian].
16. V. V. Lebedeva, *Experimental Optics* (Moscow, MSU, 2005) [in Russian].
17. Llozzi Mario, *History of Physics* (Moscow, Mir, 1970) [in Russian].

18. A. V. Tataryshkin, *Metalloobrabotka*, No. 5, 62 (2015).
19. A. I. Mekhanockov, *Black body models in metrology. Measures of noise emission*. (Mendeleevo, VNIIFTRI, 2014) [in Russian].
20. Y. V. Moskvina and Y. A. Philippov, *Sov. Heat Temperatures* 7 (4), 766 (1969).
21. S. A. Ogarev and M. L. Samoilo, in *Proc. XXIV International Conference on Photoelectronics* (Orion R&P Association, 2016). P. 481–485.
22. *HGH Company production*, [www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/](http://www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/)
23. S. P. Rousin and V. E. Peletskiy, *Thermal radiation of cavities*. (Moscow, Energoatomizdat, 1987 [in Russian].
24. Y. A. Sild, M. S. Matveev, A. I. Pokhodun, and E. V. Vi-sulainen, *Research of the new radiator of the Russian State Institute of Metrology for metrological support of radiation temperature measurement*, (S.-Petersburg); <http://temperatures.ru/pdf/Matveev1.pdf>
25. V. V. Tarasov and Y. G. Yakushenkov, *Infrared systems of “watching” type*. (Moscow, Logos, 2004) [in Russian].
26. G. N. Tolstykh, Ph.D. thesis in Engineering Science. (Moscow, Russian Scientific Research Institute of optico-physical measurements, 2001).
27. R. Hudson, *Infrared Systems*. (Moscow, Mir, 1972) [in Russian].
28. B. B. Khlevnoy, et al. *Black body model*. Patent of the Russian Federation 2148801, G01J5/02
29. A. A. Shyshlovsky, *Applied Physical Optics* (Moscow, Fizmatizdat, 1961) [in Russian].
30. P. Bernardis, *Cryogenic Detectors for low-energy astronomy. Why, When and How. Radiation Detection of low Temperature* (La Londe Les Maures, France, 2012).
31. A. Gouffe, *Rev. Optique*, 24, 1 (1945).
32. <http://naukarus.com/tsilindricheskaya-model-absolyutno-chernogo-tela-iz-hromita-lantana>
33. <http://www.constant-kazan.ru/teploluchi/30.php>
34. <http://www.omsketalon.ru/>
35. <https://habr.com/post/394997/>
36. <https://media.ls.urfu.ru/403/1083/2222/2138/724/>
37. <https://msd.com.ua/spravochnaya-kniga-po-svetotekhnike/radiometriya-i-spektroradiometriya-opticheskogo-izlucheniya/>
38. <https://www.hgh-infrared.com/ru/Media/PDF/Blackbody-selection-guide>
39. <https://www.hgh-infrared.com/ru/Produkty/Ispytanie-i-izmerenie/Absolyutno-chiornye-tela/Vysokotemperaturnoe-absolyutno-chiornoe-telo-s-rasshirenyim-diapazonom-dejstviya>
40. <https://www.ippe.ru/cooperation/industry/157-thermal-tubes>
41. <https://www.rospribor.com/>
42. V. I. Sapritsky et al., *Applied Optics* 36, 5403 (1997).